PROGRAMME DE COLLE DE PHYSIQUE

Semaine du 31/03 au 05/04

EM 8a -Ondes électromagnétiques dans le vide (cours + exercices)

– Force de Lorentz ; Équations de Maxwell.
– Forme intégrée de l'équation de Maxwell-Faraday : on montre, dans le cas d'un circuit fixe placé dans un champ magnétique variable, que l'on retrouve la loi de Faraday $e = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$.
– On montre également que l'équation de conservation de la charge $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\,\vec{\jmath} = 0$ est une conséquence des équations de Maxwell.

– Expression locale de conservation de l'énergie électromagnétique. **Dans le vide** ($\rho = 0$, $\vec{\jmath} = 0$) :

$$\frac{\partial w_{\mathrm{em}}}{\partial t} + \mathrm{div}\,\vec{\Pi} = 0$$

avec w_{em} la densité volumique d'énergie électromagnétique et $\vec{\Pi}$ le vecteur flux d'énergie électromagnétique (vecteur de Poynting) .
– On déduit des équations de Maxwell dans le vide, les expressions :

$$\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \qquad \text{et} \qquad w_{\mathrm{em}} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0}B^2$$

– Définition de l'opérateur laplacien vectoriel :

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,(\overrightarrow{\mathrm{rot}}\,\vec{A}) = \overrightarrow{\mathrm{grad}}\,(\mathrm{div}\,\vec{A}) - \vec{\Delta}\vec{A}$$

En coordonnées cartésiennes : $\vec{\Delta}\vec{A} = \Delta A_x \vec{u}_x + \Delta A_y \vec{u}_y + \Delta A_z \vec{u}_z$ avec $\Delta = \nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$ l'opérateur laplacien scalaire.
– Établissement de l'équation d'onde. Dans le vide ($\rho = 0$, $\vec{\jmath} = 0$), $\vec{E}$ et $\vec{B}$ vérifient l'équation d'onde

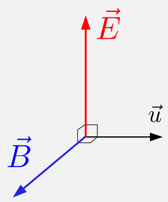
$$\vec{\Delta}\vec{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0} \qquad \vec{\Delta}\vec{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0} \qquad \text{avec} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

– Les ondes planes progressives, de la forme $\vec{E}\left(t - \frac{\overrightarrow{OM}.\vec{u}}{c}\right)$ ou $\vec{E}(\overrightarrow{OM}.\vec{u} - ct)$, se propageant à la vitesse c dans la direction $\vec{u}$, sont solutions de cette équation.
– OEM Plane Progressive Harmonique. Expression en notation complexe : $\underline{\vec{E}}(\vec{r}, t) = \underline{\vec{E}}_0\, e^{j(\omega t - \vec{k}.\vec{r})}$ avec $\vec{k} = k\vec{u}$ représente une onde de pulsation ω se propageant dans le sens de $\vec{u}$ à la vitesse c telle que $k = \dfrac{\omega}{c} = \dfrac{2\pi}{\lambda}$.
– Intérêt de la notation complexe : si on pose $\underline{\vec{E}}(\vec{r}, t) = \underline{\vec{E}}_0\, e^{j(\omega t - \vec{k}.\vec{r})}$ alors $\vec{\nabla} = -j\vec{k}$ et $\dfrac{\partial}{\partial t} = j\omega$.
– On établit les propriétés suivantes :

Une onde électromagnétique **plane progressive** dans le vide se propageant dans la direction $\vec{u}$ a une structure transverse

$$\vec{u}.\vec{E} = 0$$
$$\vec{u}.\vec{B} = 0$$

et $(\vec{u}, \vec{E}, \vec{B})$ forme un trièdre direct où : $\qquad \vec{B} = \dfrac{\vec{u} \wedge \vec{E}}{c}$



qui peut également s'écrire pour une OEMPP harmonique :

$$\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega}$$

– Onde électromagnétique plane progressive harmonique polarisée rectilignement OEMPPHPR : savoir reconnaître la direction de polarisation et la direction de propagation de l'onde à partir de l'expression de $\vec{E}$. Inversement, savoir exprimer $\vec{E}$ connaissant la direction de propagation et la direction de polarisation (voir V.2.)

– Aspect énergétique. On établit pour une OEMPPHPR, l'équipartition entre l'énergie électrique et l'énergie magnétique : $\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2\mu_0}B^2$. On établit la relation :

$$\langle w_{em} \rangle = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_0^2$$

et, pour une onde se propageant dans la direction $\vec{u}_x$:

$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c}\vec{u}_x$$

avec E_0 l'amplitude du champ électrique.

– Observations de différents états de polarisation sur des animations (seule la polarisation rectiligne est au programme)

– Action d'un polariseur ; Loi de Malus.

– Spectre des ondes électromagnétiques.

EM 8b Réflexion sous incidence normale d'une onde plane progressive monochromatique polarisée réctilignement sur un plan conducteur parfait (cours)

– Modèle du conducteur parfait : la résistivité $\rho \to 0$ et la conductivité $\gamma \to \infty$.

– Dans un conducteur parfait :

$$\vec{E} = \vec{0} \qquad \vec{B} = \vec{0} \qquad \vec{\jmath} = \vec{0} \qquad \rho = 0$$

– Relations de passage pour le champ électrique et le champ magnétique :

$$\vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\vec{n}_{1\to 2} \qquad \vec{B}_2 - \vec{B}_1 = \mu_0 \vec{\jmath}_s \wedge \vec{n}_{1\to 2}$$

– Conséquences des relations de passage à la surface d'un conducteur parfait :

- ▷ Le champ électrique ne peut être que perpendiculaire à la surface d'un conducteur parfait : la composante tangentielle de $\vec{E}$ est donc nulle à la surface d'un conducteur parfait.
- ▷ Le champ magnétique ne peut être que tangent à la surface d'un conducteur parfait : la composante normale de $\vec{B}$ est donc nulle à la surface d'un conducteur parfait.

– Détermination de l'onde réfléchie sous incidence normale : l'onde incidente, supposée polarisée rectilignement parallèlement au plan conducteur parfait, ne permet pas à elle seule de vérifier les conditions aux limites. On lui superpose une onde réfléchie, de même pulsation, de même direction de polarisation, se propageant dans la direction opposée, dont on détermine les caractéristiques à l'aide des conditions aux limites.

– Champ résultant : onde stationnaire. Nœuds et ventres de vibration pour le champ $\vec{E}$ et pour $\vec{B}$. Le plan conducteur parfait coïncide avec un nœud de vibration pour le champ électrique. Les nœuds du champ électrique coïncident avec les ventres du champ magnétique.

– Vecteur de Poynting associé à l'onde résultante. Moyenne temporelle du vecteur de Poynting : $\langle \vec{\Pi} \rangle = \vec{0}$.

– Détermination de la densité surfacique de courant à la surface du conducteur parfait, à partir de la condition aux limites pour le champ magnétique.